

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra Elektroenergetiky

Měření doskokové vzdálenosti
kulového jiskřiště
Measuring of the Distance sphere Gap

2016

Michal Zuber

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Zuber**
Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **3907R001 Elektroenergetika**
Téma: **Měření doskokové vzdálenosti kulového jiskřiště**
Measuring of the Distance sphere Gap
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Charakterizujte možnosti měření vzdáleností v oblasti mikrometry až metry.
2. Popište stávající způsoby měření doskokové vzdálenosti jiskřišť a posuďte další možnosti.
3. Navrhněte zpřesnění měření doskokové vzdálenosti kulového jiskřiště v laboratoři E122.

Seznam doporučené odborné literatury:


MACH, Velešlav. Technika vysokého napětí. Ostrava: Skriptum, ES VŠB-TUO, 2001, 110 s.
ISBN 80-7078-879-9


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Velešlav Mach**

Datum zadání: 01.09.2015
Datum odevzdání: 29.04.2016




prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 29.4.2016

[Signature]

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Dr. Ing. Věslavu Machovi za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat svým kolegům za některé nápady a kritiku mých návrhů.

Abstrakt

Tato práce řeší měření doskokové vzdálenosti kulového jiskřiště. Zaměřuje se pak na zpřesnění měření této délky v laboratoři E122 Vysoké školy báňské Technické univerzity Ostrava na Fakultě elektrotechniky a informatiky. V této práci jsem sepsal moderní metody měření vzdálenosti s využitím optiky, akustiky, elektrických veličin a měření mechanického otáčení. Dále jsem vypracoval metodu měření pomocí fotoaparátu. U těchto metod jsem zhodnotil vhodnost těchto měření pro laboratoř E122 a vybral tu nejvhodnější. Jako nejvhodnější byla zvolena metoda s použitím světelné brány, která dosahovala dostatečné přesnosti a nízké ceny. Na základě této práce je vidět problematika měření vzdálenosti pod napětím na kulovém jiskřišti a možné náznaky metod jak tuto vzdálenost měřit.

Klíčová slova

Doskoková vzdálenost, měření vzdálenosti, kulové jiskřiště, světelná brána, měření otáček, selsyn, akustické měření délky, optické měření délky, měření délky fotoaparátem, laserový mikrometr, laserová triangulace, kofokální měření délky

Abstract

This thesis addresses the measurement of a distance of the sphere gap. Thesis aims at the more accurate measurement of this length in the laboratory E122 VSB Technical University of Ostrava at the Faculty of Electrical Engineering and Computer Science. In this thesis, I wrote down modern methods of distance measurement using optics, acoustics, electrical variables and measurement of mechanical rotation. I also draw up the method of measurement using a camera. I have evaluated the suitability of these methods for the use in the laboratory E122 and chose the most suitable one. As the most promising method, I chose the method which uses light gate, which reached sufficient accuracy in hand with low price. On the basis of this work, it's clear to see the issue of measuring distances with high voltage on the sphere gap and possible hints of methods to measure this distance.

Key Words

Distance of the sphere gap, distance measuring, sphere gap, light gate, speed measurement, selsyn, acoustic distance measurement, optical measurement of distance, distance measurement camera, laser micrometer, laser triangulation, confocal distance measurement

Obsah

Obsah.....	5
Seznam použitých zkratk a symbolů	7
Seznam ilustrací	7
Seznam tabulek.....	7
Úvod	8
1. Charakterizace možností měření vzdáleností	9
1.1. Metody měření natočení hřídele	9
1.1.1. Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí světelné brány	9
1.1.2. Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí magnetických elementů	9
1.1.3. Měření servomotorem	9
1.2. Metody měření pomocí akustiky	10
1.2.1. Ultrazvuková metoda.....	10
1.3. Metody měření pomocí optiky	10
1.3.1. Princip laserové triangulace	10
1.3.2. Konfokální princip.....	12
1.3.3. Optický mikrometr	13
1.4. Metody měření pomocí elektrických veličin	14
1.4.1. Princip vířivých proudů.....	14
1.4.2. Kapacitní princip	15
1.5. Speciální metody	16
1.5.1. Měření pomocí fotoaparátu/kamery	16
2. Stávající způsob měření doskokové vzdálenosti a další možnosti používané ve VN zkušebnách	17
2.1. Metody používané ve VN zkušebnách	17
2.1.1. Použití měrek.....	17
2.1.2. Použití selsynů.....	17
2.1.3. Mechanické měření	18
2.2. Stávající stav laboratoře E122	18
3. Charakterizace měření doskokové vzdálenosti pro laboratoř E122	19
3.1. Metody měření převodem mechanického pohybu.....	19
3.1.1. Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí světelné brány	19
3.1.2. Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí magnetických elementů	20
3.1.3. Měření servomotorem	21

3.2.	Metody měření pomocí akustiky	22
3.2.1.	Ultrazvuková metoda.....	22
3.3.	Metody měření pomocí optiky	22
3.3.1.	Princip laserové triangulace	22
3.3.2.	Konfokální princip.....	23
3.3.3.	Optický mikrometr	24
3.4.	Metody měření pomocí elektrických veličin	24
3.4.1.	Princip vířivých proudů	24
3.4.2.	Kapacitní princip	24
3.5.	Speciální metody	25
3.5.1.	Měření pomocí fotoaparátu/kamery	25
Závěr.....		27
Použitá literatura.....		28

Seznam použitých zkratek a symbolů

A (cm) výška bodu doskoku nad rovinou země

B (cm) polměr koule okolo bodu doskoku kde nesmí být cizí tělesa,

C (pF) elektrická kapacita

D (cm) průměr koulí jiskřiště

l (mm) délka posunu na jeden impuls

n (ks) počet měřicích prvků

R ($^{\circ}$) rozdílový úhel mezi jednotlivými měřicími prvky

r (cm) poloměr koule jiskřiště

S (cm) doskoková vzdálenost

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Princip ultrazvukového měření vzdálenosti	10
Obrázek 2 princip triangulace	11
Obrázek 3 Konfokální princip zaostření světla určité vlnové délky.....	12
Obrázek 4 Nejběžnější metody měření pomocí optického mikrometru	14
Obrázek 5 Schéma zapojení SV – Selsyn Vysílač a SP – Selsyn přijímač	17
Obrázek 6 Stávající měřidlo na kulovém jiskřišti	18
Obrázek 7 Kulové jiskřiště v laboratoři E122	19
Obrázek 8 Ukázka vyfotografování kulového jiskřiště pro následné měření	26

Seznam tabulek

Tabulka 1 Tabulka vzdáleností předmětů od kulového jiskřiště	8
Tabulka 2 Vypočtené kapacity pro doskokovou vzdálenost	25

Úvod

Tato práce bude obsahovat metody měření doskokové vzdálenosti kulového jiskřiště. Kulové jiskřiště je elektrotechnický nelineární prvek, využívající principu elektrického výboje v plynech. Tento prvek se skládá ze dvou proti sobě postavených koulí, mezi kterými je vzduchová mezera. Jedna koule je zpravidla uzemněná, zatímco na druhou kouli je přiveden potenciál. Hlavní charakteristikou jiskřiště je zapalovací napětí. Toto napětí je ovlivněno okolním atmosférickým prostředím a doskokovou vzdáleností, jejíž měření a nastavování je tématem této práce. Jsou dvě metody jak jiskřiště sepnout. První z nich je zvyšování napětí do překročení zapalovacího napětí, kdy jiskřiště sepne. Druhá metoda je snižování doskokové vzdálenosti až do sepnutí jiskřiště. Při sepnutí jiskřiště dojde k přeskocení jiskry mezi koulemi a vzniká elektrický oblouk. Tím se jiskřiště spíná – uvede se do vodivého stavu.

Průraz napětí

K průrazu napětí dochází při překročení maximálního napětí, které je dáno průměrem použitých koulí a jejich vzdáleností. Průraz vzduchu, jehož elektrická pevnost, když je pole homogenní, je 30 kV/cm, nastává působením silného elektrického pole mezi elektrodami.

Přesnost měření

Jelikož při výboji mezi kulovými elektrodami dochází k poměrně velkému rozptylu, je potřeba k dosažení dané přesnosti každé měření několikrát opakovat a správnou hodnotu určit aritmetickým průměrem tří hodnot jdoucích po sobě, u kterých nedojde k větší odchylce krajních hodnot, než jsou 3%. Přesnost jednotlivých měření střídavého a rázového napětí je $\pm 3\%$ a pro měření stejnosměrných napětí $\pm 5\%$.

Vzdálenost okolo koulí

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny meze, v kterých musí ležet výška A, bodu doskoku koule s vysokým napětím nad rovinou země. Bod doskoku koule s vysokým napětím nesmí být vzdálen k vnějšímu předmětu (tím se myslí např. strop nebo stěna), ale i nosné konstrukci koulí (pokud je zhotovena z vodivého materiálu), o méně než o hodnotu vzdálenosti B, která je uvedena v tabulce 1 (8). Bez níže uvedené výjimky nemůže být vzdálenost B menší než $2D$ bez ohledu na hodnotu S.

Touto výjimkou jsou nosné konstrukce koulí vyrobené z izolačního materiálu v případě, že mají povrchy suché a čisté a dále, že se koule využívají jen pro měření impulzního nebo střídavého napětí. Poté může být vzdálenost B mezi bodem doskoku koule s vysokým napětím a nosnou konstrukcí menší než je uvedeno v tabulce 1(8), avšak nesmí být menší než $1,6D$.

Použitá literatura

[10][12][13]

Tabulka 1 Tabulka vzdáleností předmětů od kulového jiskřiště

Průměr koulí D [cm]	Nejmenší hodnota A	Největší hodnota A	Nejmenší hodnota B
do 6,25	7D	9D	14S
10 až 15	6D	8D	12S
25	5D	7D	10S
50 a 75	4D	6D	8S
100 a 125	3,5D	5D	7S
150 a 200	3D	4D	6S

1. Charakterizace možností měření vzdáleností

1.1. Metody měření natočení hřídele

1.1.1. Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí světelné brány

Metoda založená na pohybu předmětů v ose pohybu se závitem se známou stoupavostí tohoto závitu. Motor otáčející hřídeli pohybuje s posouváním předmětem. Na hřídeli je umístěna kotoučová nástavba, která se otáčí společně s hřídelí. V této nástavbě jsou precizně vyvrtány otvory v přesně daných rozestupech. Velikost rozestupů a počet děr zvyšuje přímou úměrou přesnost takového měření. Na úrovni děr je zabudována světelná brána s čítačem impulsů. Každý tento impuls se bude přes výpočetní elektroniku přičítat nebo odečítat v závislosti na směru otáčení motoru. Výpočetní elektronika bude tyto impulsy převádět na reálnou vzdálenost jednoduchým přenásobením počtů impulsů stoupavostí závitu na hřídeli. Poté již stačí zajistit zobrazení vypočítané vzdálenosti na displeji.

Tato metoda je velmi primitivní, levná a vzhledem k možnosti zvyšování přesnosti i přesná. Požadavky na tuto metodu jsou pouze konstrukční prvky jako kruhová nástavba, světelná závora a výpočetní elektronika s displejem.

1.1.2. Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí magnetických elementů

Tato metoda je velmi podobná předcházející metodě. Tedy metodě Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí světelné brány, místo světelné brány a vyvrtaných děr na kruhové nástavbě jsou použity magnetické elementy na této nástavbě. Jejich počet zvyšuje přesnost obdobně jako díry u předchozí metody. Místo světelné brány je použit magnetické čidlo obdobné jako PMR hlava u pevných disků ve výpočetní technice. Toto čidlo bude při překrytí magnetického elementu vysílat impulsy do čítače impulsů, který tyto impulsy bude přičítat nebo odečítat podle směru otáčení motoru a přepočítávat na vzdálenost pomocí stoupání závitů. Tato vypočtená vzdálenost je potom zobrazována na displeji. U této metody je důležité zvolit správně citlivé magnetické čidlo. Na velmi citlivé čidlo mohou mít vliv vzdálené magnetické předměty. Nízká citlivost může naopak vést k špatnému odečítání magnetických elementů v případě, že jsou velmi těsně u sebe.

Tato metoda je velmi primitivní, levná a vzhledem k možnosti zvyšování přesnosti i přesná. Požadavky na tuto metodu jsou pouze konstrukční prvky jako kruhová nástavba, magnetické elementy, magnetické čidlo a výpočetní elektronika s displejem.

1.1.3. Měření servomotorem

Servomotor je motor většinou elektricky poháněný, kterým se dá nastavit přesnou polohu natočení osy. Jeho princip činnosti je založený na poli permanentně magnetizovaného motoru, které se tvoří mezi dvěma či více permanentními magnety. Nejčastěji feritovými magnety. Nejčastěji se používají jako stejnosměrné motory.

Výhodou servomotoru je, že můžeme dosáhnout velmi velké přesnosti. Jeho nevýhodou je, že potřebuje ke své práci driver, který řídí otáčky motoru a tím výsledný posun. Dále je třeba vyřešit přepočet otáček na posun. Realizace by mohla být digitální nebo mechanická. U mechanické realizace je možnost převodu těchto otáček pomocí lanka a následné zobrazení na budíku s rafikou obdobně jako u tachometru vozidel. Digitální realizace je vhodnější vzhledem k nutnosti použít elektronický driver pro řízení otáček a zároveň je možnost jej použít pro výpočet vzdálenosti. [4]

1.2. Metody měření pomocí akustiky

1.2.1. Ultrazvuková metoda

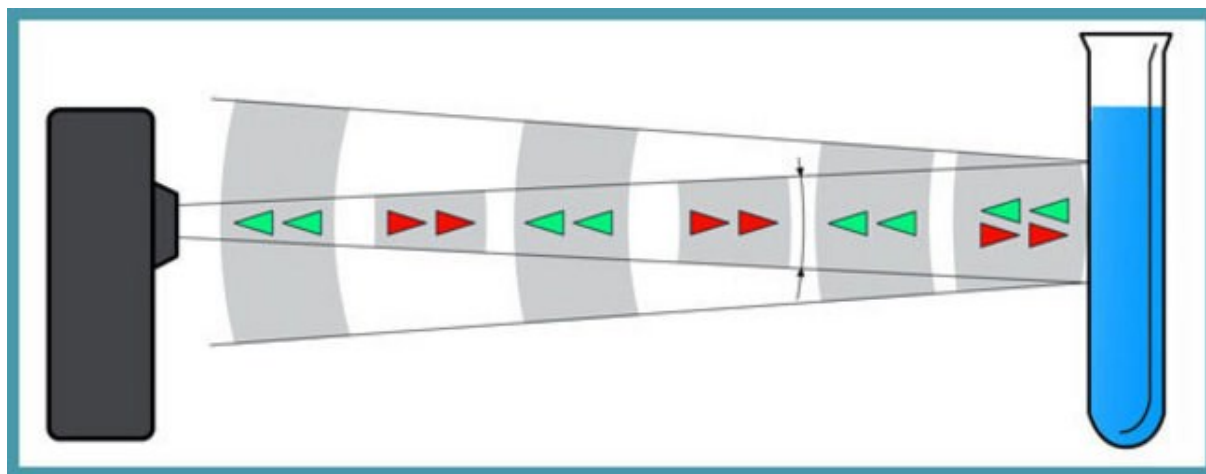
Ultrazvukové senzory se v průmyslových aplikacích vyznačují spolehlivostí a vynikající univerzalitou. Ultrazvukové senzory se mohou používat k řešení i těch nejsložitějších úloh, včetně detekce objektů nebo měření hladiny s milimetrovou přesností, protože jejich metoda měření spolehlivě funguje téměř ve všech podmínkách.

Ultrazvukové měřicí prvky pracují na ultrazvukové frekvenci od 60kHz do 850kHz. Senzory na větší vzdálenost používají nižší frekvence a na krátké vzdálenosti používají velké frekvence. Každý senzor musí být předem nastavený pro dané prostředí, ve kterém bude měřit. Senzory využívají piezokeramiku k vytvoření ultrazvukového vlnění. Tato piezokeramika je připojena k elektronice přes dvě elektrody, přes které se pouští signál o dané frekvenci. Touto frekvencí poté kmitá piezokeramika a generuje ultrazvuk. Při odrazu vln od objektu převodník vlnění funguje i jako přijímač a převádí vlnění zpět na elektrický signál. Senzor poté přepočítává časové zpoždění vysílaného vlnění a přijatého. Při pokojové teplotě je rychlost zvuku 344m/s. Výpočet vzdálenosti z rychlosti a času je již primitivní výpočet.

Tato metoda může být použita pro téměř všechny povrchy a tvary objektů. Jediné omezení jsou objekty z materiálů, které jsou pórovité, nakloněné, hebké nebo jiné, které mají špatnou odrazivost zvuku nebo jej odráží jiným směrem. Takové materiály jsou plst', vlna, pěna a měkké gumy.

Přesnost těchto senzorů se pohybuje mezi 1-3% při teplotách -25°C až 70°C. Je zřejmé, že se dosahuje vyšší přesnosti uzpůsobením podmínek, které je měřicí senzor nastaven. Další možností jak zvýšit přesnost je přidat jeden či více dalších senzorů a porovnávat a průměrovat naměřené hodnoty.

[3][9][11]



Obrázek 1 Princip ultrazvukového měření vzdálenosti

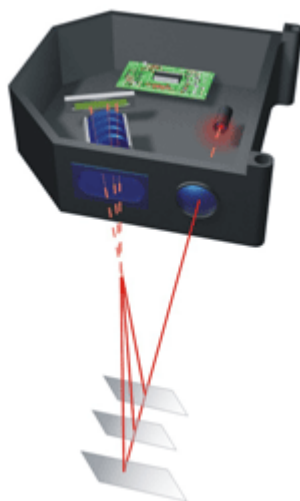
1.3. Metody měření pomocí optiky

1.3.1. Princip laserové triangulace

Princip triangulace vychází z výpočtů v pravoúhlém trojúhelníku. Tedy úzký světelný paprsek dopadá pod určitým úhlem na měřený objekt. Od tohoto objektu se paprsek odráží zpět k snímači také pod

daným úhlem. Snímač je vybaven CCD plochou. Odražený paprsek vychýlený od vysílače dopadá právě na tuto CCD plochu a snímač měří vzdálenost dopadajícího paprsku od vysílaného paprsku. Snímač tedy zná jednu stranu trojúhelníku a protilehlý úhel. Z těchto dvou hodnot je již schopen dopočítat výslednou vzdálenost předmětu odrážejícího paprsek od snímače.

Tento princip využívají nejmodernější senzory, protože se nevyhodnocuje intenzita světelného paprsku ani doba, za kterou se paprsek odrazí zpátky ale pouze geometrické vlastnosti světla. Díky tomu je tato metoda přesnější, spolehlivější a výrazně odolnější proti vnějšímu rušení. Pokud má paprsek dopadající na CCD plochu intenzitu alespoň takovou, jaká je hodnota detekovatelnosti, je snímač schopen změřit vzdálenost. Také je důležitý měřicí rozsah snímače. Tento je limitován právě velikostí CCD plochy. Pokud se paprsek odráží mimo CCD plochu, je nemožné takovou vzdálenost změřit a je třeba použít snímač s větším nebo menším snímačem.



Obrázek 2 princip triangulace

Další možností jak využít tento snímač je měření tloušťky průhledných nebo průsvitných materiálů. V tomto případě na CCD plochu dopadají dva paprsky. Jeden paprsek je odražený přímo od povrchu materiálu, který měříme. Druhý dopadající paprsek je odražen od překážky za měřeným materiálem. Takto vzniklé dva body na CCD ploše vytváří 2 pravoúhlé trojúhelníky se známými úhly, jejichž strany snímač dopočítá. Rozdíl těchto dvou vzdáleností je poté měřená tloušťka materiálu.

Nevýhodou této metody měření je již zmiňovaný měřicí rozsah a nemožnost používání jednoho snímače pro měření všech délek. Na druhou stranu je toto měření velmi rychlé a přesné, čímž se tato nevýhoda kompenzuje. [2]

1.3.2. Konfokální princip

Tato metoda je založena na zaměření polychromatického bílého světla na měřenou plochu pomocí soustavy konfokálních čoček (čočky se stejným ohniskem). Pomocí těchto čoček a chromatické odchylky se bílé světlo rozloží na monochromatické světlo. Jednotlivé odchylky se pro každou složku světla kalibrují při výrobním procesu. Díky tomuto se využívá pouze přesně zaměřená vlnová délka světla. Ostatní vlnové délky, které se projevují na elektro-optickém snímači jako neostře, se odfiltrují. Toto odfiltrování je zajištěno tzv. konfokální clonou. Tato clona filtruje neostře vlnové délky a také jakékoliv rušení. Jakmile dopadá na elektro-optický snímač pouze jedna vlnová délka světla, snímač zpracovává změny spektra dané vlnové délky.

Hlavní výhodou těchto měřících prostředků je možnost velmi přesného a nerušeného měření i průhledných materiálů jako je sklo. Také díky uspořádání přijímače a vysílače do jedné osy se vyvarujeme stínění. Při tomto měření nezáleží na materiálu, ze kterého je měřený objekt vyroben. Měření velmi malých ploch je také možné. Přesnost měření je v řádech nanometrů. Hlavní nevýhodou je pak limitovaný snímací dosah a požadavek na velkou čistotu okolního prostředí. [3][6][9]



Obrázek 3 Konfokální princip zaostření světla určité vlnové délky

1.3.3. Optický mikrometr

Optické zařízení pro měření rozměrů předmětů, které zastihují světelný pruh vyzařovaný z vysílače. Velmi přesná metoda využívána převážně v průmyslových odvětvích k měření vstupních rozměrů výrobků, kontrole v průběhu zpracování a výstupní kontrole.

Dělení optických mikrometrů:

První možnost dělení je princip funkce přijímače. První skupina mikrometrů používá jako detektor fotodiodu. Tento princip je rychlý. Měří se světlo dopadající na fotodiodu zaostřené přes čočku. Druhá metoda je za použití CCD-CMOS řádkových snímačů. Tyto snímače jsou umístěny v řádku vedle sebe a každý z nich zaznamenává údaje o intenzitě a jasu světla, které na něj dopadá. V tomto případě je možnost použít náročnější metody pro měření. Základními metodami jsou metody komparační a metody využívající vlastností první a druhé derivace funkce jasu v závislosti na poloze.

Další možnost dělení je princip funkce vysílače. U vysílačů se používají buď světelné diody (LED) nebo laserové diody

Důležité vlastnosti optických mikrometrů

Rozlišovací schopnost – schopnost rozlišovat jednotlivé hrany měřeného objektu.

Linearita v pracovním rozsahu – jedná se o průměrování mezihodnot mezi jednotlivými pixely kalibrované na určitou vzdálenost mezi měřeným objektem a přijímačem/vysílačem.

Pracovní rozsah měření – Maximální plocha paprsku se zachováním přesnosti deklarované výrobcem. Jde o maximální vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem a také šířku vysílaného paprsku. Tato vlastnost je ovlivněna výkonem vysílače pro délku paprsku a jeho velikostí pro šířku paprsku.

Vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem – maximální vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem na kterou se dá daný objekt změřit. Při překročení této vzdálenosti většinou nejde s přístrojem měřit (paprsek světla nedosáhne tak daleko) nebo je měření velmi nepřesné.

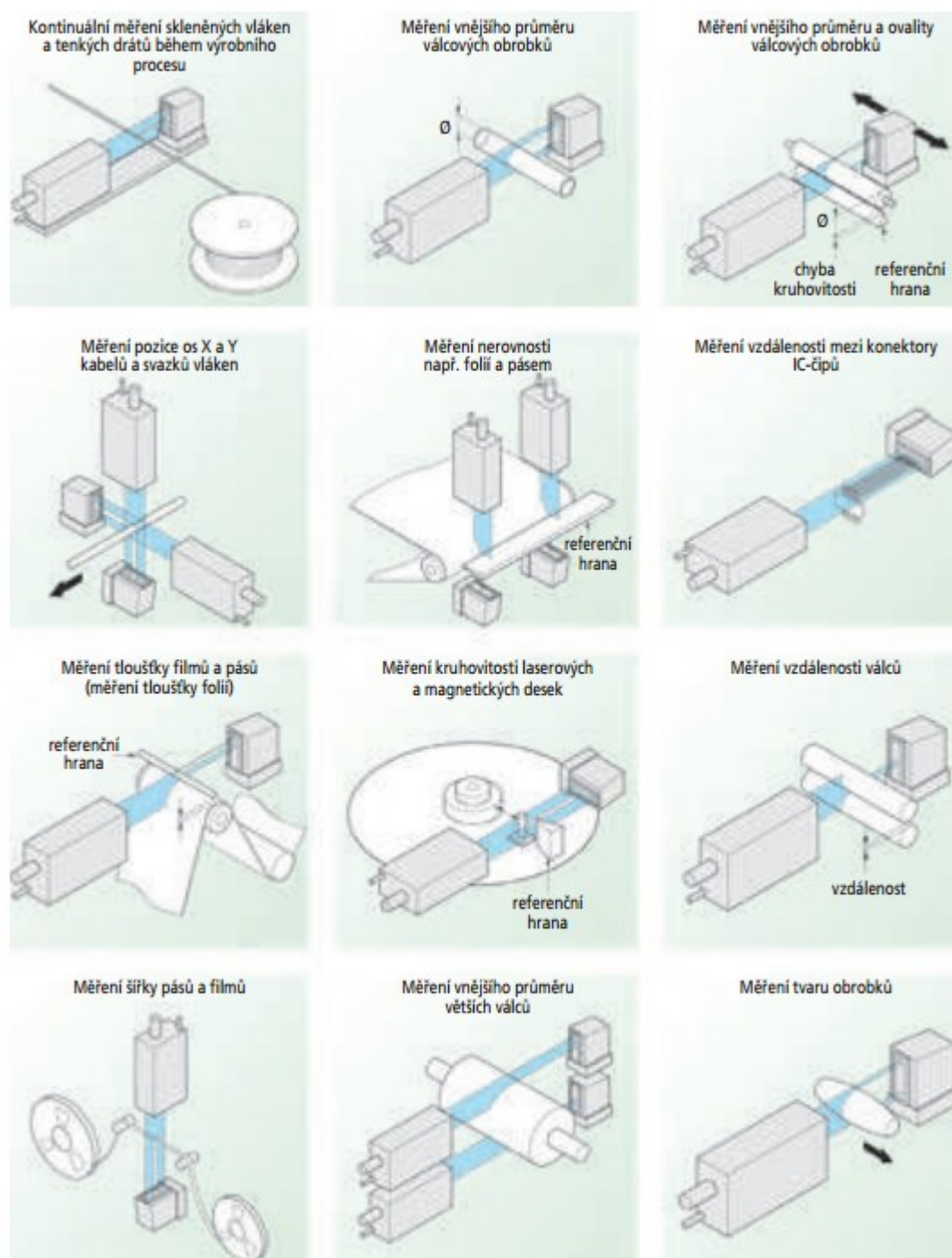
Druh světelného zdroje a jeho výkon – světelný zdroj je LED nebo laserová dioda. Výkon se udává v mW, W.

Výstupní rozhraní – většinou je přístroj vybaven displejem pro zobrazování hodnot. Některé dražší přístroje jsou vybaveny rozhraním pro připojení počítače nebo řídicí jednotky, díky které je možno provádět další pokročilejší vyhodnocování výsledků.

Cena – optické mikrometry jsou finančně nákladné a cena je základní parametr pomocí, kterého zvažujeme jeho koupi.

Metody měření

Většina optických mikrometrů, mimo kapesní mikrometry, komunikuje přes různé sběrnice s počítačem, pomocí kterého se vyhodnocují detailnější údaje. Klasickým vybavením většiny mikrometrů je displej, na kterém se zobrazuje naměřená vzdálenost podle režimu měření. Můžeme měřit šířku předmětů, jejich průměr, velikost děr, nerovnosti materiálu a mezeru mezi objekty. Nejčastější způsoby měření jsou zobrazeny na obrázku (Obrázek 4). [6][7][8]



Obrázek 48

1.4. Metody měření pomocí elektrických veličin

1.4.1. Princip vířivých proudů

Princip měření vířivých proudů vychází z indukční měřicí metody založené na extrakci energie z oscilačního obvodu. Tato energie je potřeba pro indukci tzv. vířivých proudů v elektricky vodivých materiálech. Cívka je napájena střídavým proudem, který vytváří magnetické pole kolem cívky. Pokud je elektricky vodivý předmět umístěn do tohoto magnetického pole, indukují se vířivé proudy, což

podle Faradayova indukčního zákona vytvoří elektromagnetické pole. Toto pole působí proti poli cívky, což také způsobuje změnu impedance cívky. Řídicí jednotka vypočítá impedanci podle změny amplitudy a fázového posunu.

Výhodou principu vířivých proudů je, že může být použit na všechny elektricky vodivé, feromagnetické a nemagnetické kovy. Velikost snímače je ve srovnání s jinými technologiemi relativně malá a rozsah pracovní teploty je vysoký. Tato technologie zaručuje vysokou přesnost a je odolná vůči nečistotám, prachu, vlhkosti, oleji, vysokému tlaku a dielektrickým materiálům v místě měření.

Je také třeba zvážit omezení této technologie. Výstup a linearita závisí na elektrických a magnetických vlastnostech cílového materiálu. Z tohoto důvodu je často nutná individuální linearizace a kalibrace systému. Délka kabelu je maximálně 15 m a průměr snímače (a tedy i efektivní plocha měření) se zvyšuje spolu s měřicím rozsahem. [3][9][14]

1.4.2. Kapacitní princip

Díky kapacitnímu principu fungují snímač a cíl jako ideální paralelní desky kondenzátoru. Dvě elektrody jsou tvořeny snímačem a protichůdným cílem. Pokud kondenzátorem protéká střídavý proud o konstantní frekvenci, amplituda střídavého napětí na senzoru je úměrná vzdálenosti mezi elektrodami kondenzátoru. Nastavitelné kompenzační napětí je současně generováno pomocí zesilovače elektroniky. Po demodulaci obou střídavých napětí je rozdíl zesílen a přenesen jako analogový signál.

Snímače jsou konstruovány s dvojitým stíněním měřicího pole, což umožňuje dosáhnout téměř ideální linearity a citlivosti. Tato technologie také nabízí vysokou teplotní stabilitu, protože změny ve vodivosti cíle nemají žádný vliv na měření. Kapacitní senzory mohou měřit také izolanty. Tato technologie je nicméně citlivá na změny v dielektrické mezeře snímače, a proto je vhodná pouze pro čisté a suché prostředí. Délka kabelu je také relativně krátká vzhledem k vlivu jeho kapacity na ladění oscilačního obvodu. [14]

1.5. Speciální metody

1.5.1. Měření pomocí fotoaparátu/kamery

Tato speciální a inovativní metoda se již využívá, ale není tak běžná, proto jsem ji zařadil do speciálních metod. Princip této metody je porovnávání nějakého známého objektu, u kterého známe alespoň jeden rozměr, s objektem jehož rozměry neznáme.

Při zachycení obou objektů na fotografii ve stejné vzdálenosti od fotoaparátu stáhneme tuto fotografii do počítače. Většina moderních digitálních kamer a fotoaparátů mají funkci webkamery. Tudíž je možnost tyto záběry stahovat online do počítače. V počítači se nastaví rozměr známé části objektu (například velikost šroubu konstrukce stojanu) a zadá se rozměr, který chceme zjistit. Počítač zadané data zpracuje. Spočítá počet pixelů známého rozměru a následně počet pixelů zjišťovaného rozměru. Po zjištění těchto digitálních délek již není problém spočítat reálný rozměr měřeného objektu.

Toto měření je velmi interaktivní a zajímavé ale má svá úskalí. Nejzásadnější je prostředí. Oba objekty musí být na fotce přesně rozeznatelné, jelikož počítač počítá pixely podle jejich barvy. Předměty nesmějí mít ani žádné odlesky a musí být patrný celý známý i hledaný rozměr.

Další faktor je samotný fotoaparát. Je nutné mít pevné umístění na stativu nebo stole, protože třes rukou může toto měření ovlivnit. Také doporučuji fotografovat přes samospoušť. Rozlišení CCD čipu fotoaparátu je přímo úměrné celkové přesnosti měření. Čím větší rozlišení fotoaparát má, tím více pixelů zaznamená na určitý rozměr. Z této logiky vyplývá přesnost fotoaparátu a to konkrétně jednu polovinu pixelu. Dále je běžná komprimace fotografií přímo ve fotoaparátu pro šetření místa na paměťovém zařízení. Tato funkce musí být na fotoaparátu vypnutá. Koprese dat z TIFF do JPG velmi snižuje kvalitu fotografie a tudíž i přesnost měření.

2. Stávající způsob měření doskokové vzdálenosti a další možnosti používané ve VN zkušebnách

2.1. Metody používané ve VN zkušebnách

Během vypracovávání jsem kontaktoval velké množství VN zkušeben a laboratoří jak v ČR, tak v zahraničí. Většina neodpovídala ani na opakované dotazy. Zbylá část nebyla schopná odpovědět na moje dotazy vzhledem k vázanosti mlčenlivosti o postupech měření nebo jim měření zajišťovala externí firma, která taktéž neodpovídala. Z tohoto důvodu jsem zpracoval pouze metody, které mi sdělil vedoucí bakalářské práce pan doc. Dr. Ing. Veleoslav Mach.

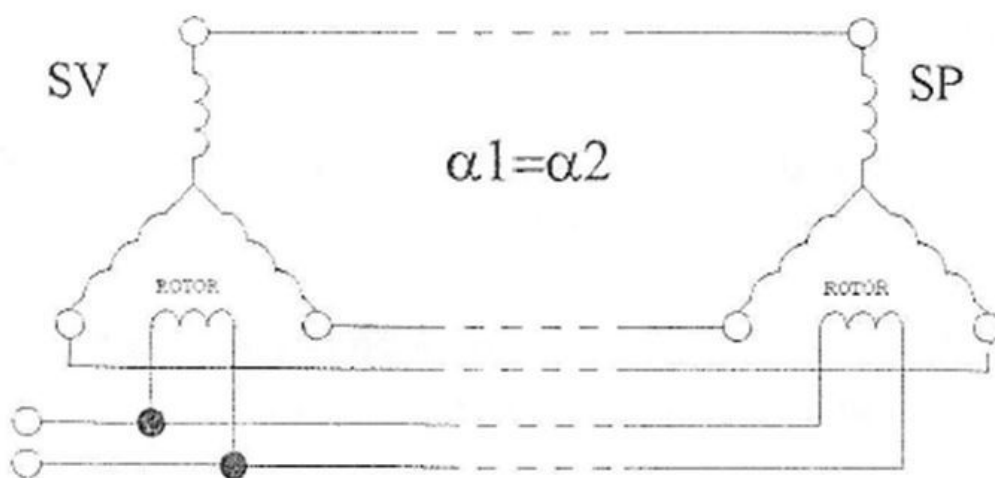
2.1.1. Použití měrek

Tato metoda je velmi jednoduchá. Jejím základem jsou přesně kalibrované měrky. Tyto měrky jsou zpravidla z kovu. Jakmile se elektrody jiskřiště přiblíží k sobě. Vloží se mezi ně daná měrka podle požadované vzdálenosti. Jakmile dojde ke kontaktu mezi elektrodami je nastavena požadovaná vzdálenost. Tato metoda je velmi primitivní ale má řadu nevýhod. Hlavní nevýhodou je nutnost měření v beznapěťovém stavu z hlediska bezpečnosti. Další nevýhoda je možnost testovat pouze na dané vzdálenosti tzn. nelze snižovat doskokovou vzdálenost v průběhu zkoušky, protože ji nemáme jak změřit, pokud nepoužijeme další měřicí metodu.

2.1.2. Použití selsynů

Selsyny jsou založeny na elektromagnetické indukci a celkovým uspořádáním se podobají elektrickým strojům točivým. Jejich využití je hlavně jako snímač polohy natočení. Jsou konstruovány podobně jako třífázové motory. Stator je trojfázový a rotor jednofázový. Musí se používat ve dvojicích kde jeden selsyn je vysílač a druhý přijímač. Pokud společně propojíme statory obou selsynů a rotory napájíme ze stejného střídavého zdroje. Při natočení rotoru jednoho selsynů se naindukují proudy ve statoru a přenesou se na stator druhého selsynu. Tyto proudy poté vedou k otočení rotoru druhého selsynu. Chyba této výchyly je do 1%. Toto natočení je poté převáděno na výstupní stupnici, kde se zobrazuje měřená vzdálenost. Využití není přímo pro měření vzdálenosti ale jako převádění mechanického natočení pomocí elektrického signálu na dálku. Díky tomuto soustrojí není třeba měřit natočení motoru přímo na jiskřišti. Měření probíhá vzdáleně třeba u ovládacího pultu bez nutnosti přiblížení obsluhy k jiskřišti.

[5]



Obrázek 5 Schéma zapojení SV – Selsyn Vysílač a SP – Selsyn přijímač

2.1.3. Mechanické měření

Ve VN zkušebnách se také používají různě převodované motory. Tyto motory mají na hřídeli zařízení snímající otáčky hřídele, které se poté mechanicky převádějí jako natočení rafiky na budíku.

2.2. Stávající stav laboratoře E122

Aktuální metoda měření doskokové vzdálenosti kulového jiskřiště je velmi nepřesná. Sestává se z pravítka umístěného na ose pohyblivé koule. Vzdálenost ukazuje drátek připájený ke konstrukci jiskřiště viz Obrázek 6. Tento drátek je hlavní příčinou nepřesnosti měření vzdálenosti neboť je různě pokrivený a lehce se tře o pravítko, čímž se ještě více deformuje. Před každým měřením je nutná „kalibrace“ tohoto měřicího ústrojí, kdy se koule přibližují k sobě tak dlouho, dokud nedojde ke kontaktu mezi koulemi. V tomto okamžiku se drátek zakřiví tak, aby ukazoval na nulu, a poté se teprve nastavuje požadovaná vzdálenost. Tím dochází ke zdržení. Pokud se přibližování bude provádět i po kontaktu koulí hrozí, že koule, které na sebe navzájem vyvíjí tlak, se deformují, což může ovlivnit přesnost samotného měření na kulovém jiskřišti.

U této metody jsou velké nároky na obsluhu. Jeden člověk ovládající pult přibližuje nebo oddaluje koule pomocí tlačítek. Druhý člověk sleduje posun koulí z bezpečné vzdálenosti za Faradayovou klecí a pozoruje pravítko. Při překročení doskokové vzdálenosti se zapálí oblouk a druhý člen obsluhy musí na vzdálenost přibližně 1 metr odečíst hodnotu z pravítka v milimetrech.



Obrázek 6 Stávající měřidlo na kulovém jiskřišti

3. Charakterizace měření doskokové vzdálenosti pro laboratoř E122

V této kapitole budu postupně rozebírat jednotlivé metody z kapitoly 1 a 2 a popisovat jejich možné použití pro kulové jiskřiště v laboratoři E122. Výsledná požadovaná přesnost měření vzdálenosti je maximálně 0,1 mm pro zajištění přesného měření na jiskřišti.

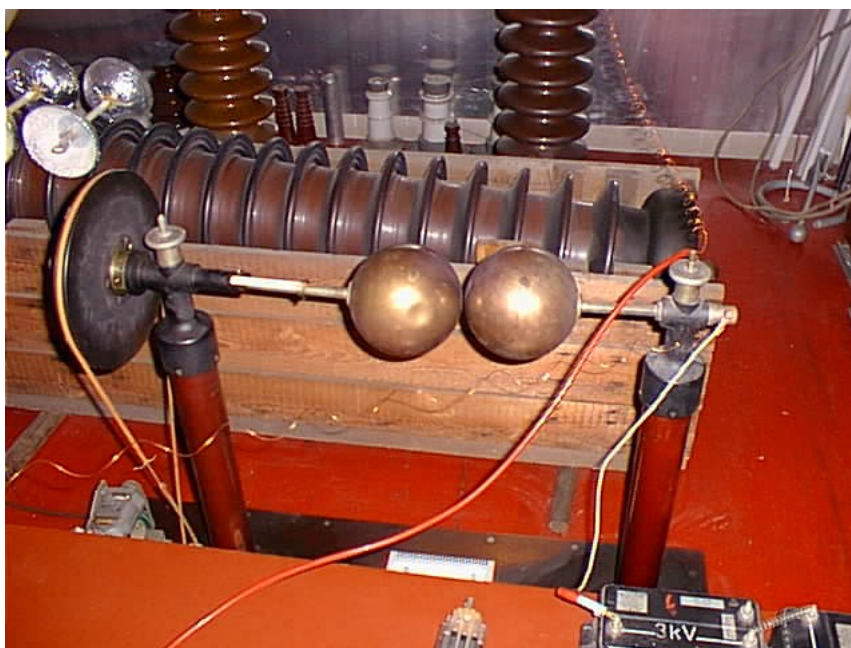
Před samotným vyhodnocováním metod je třeba znát určité parametry kulového jiskřiště.

Průměr koulí $D = 15 \text{ cm}$

Maximální napětí $U_{max} = 200 \text{ kV}$

Stoupavost závitu na mechanismu posunu koulí 1,3 mm/otáčku

Jelikož přesné měření probíhá do poskokové vzdálenosti $0,5D$ je při průměru koulí v laboratoři E122 maximální poskoková vzdálenosti 7,5 cm. Požadovaná odchylka měření je tedy 2,25 mm z maximální hodnoty. Mou snahou bude vybrat metodu mnohem přesnější. Budu vybírat metody s absolutní chybou 0,1 mm nebo menší.



Obrázek 7 Kulové jiskřiště v laboratoři E122

3.1. Metody měření převodem mechanického pohybu

3.1.1. Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí světelné brány

Jak bylo popsáno výše tato metoda je založená na měření stoupavosti závitu. Samotná chyba měření bude rovna polovině dílčí hodnoty stoupavosti v závislosti na počtu děr v kruhové nástavbě. Výpočet délky posunu na jeden impuls neboli na jednu díru vychází z následující rovnice (1):

$$l = \frac{1,3}{n} \quad (1)$$

Pro naše měření doporučuji vyvrtat do kruhové nástavby alespoň 26 děr. Při dosazení (2):

$$l = \frac{1,3}{26} = 0,05 \text{ mm} \quad (2)$$

Je měřená vzdálenost jednotlivými impulzy 0,05 mm. Tato hodnota je dostatečná pro přesnost našeho měření. Pro dodatečné zvýšení přesnosti je možnost vyvrtat další díry. Konkrétní počet děr poté opět dosadíme do rovnice a zjistíme, o kolik se nám zvýšila přesnost, respektive délka posunu na jeden impuls.

Dalším konstrukčním prvkem je samotná světelná brána. Tu může nahradit jednoduchý elektronický obvod s LED diodou na jedné straně a fotodiodou na druhé. Při dopadu světla skrz díry v nástavbě na fotodiodu bude procházet diodou proud. Na fotodiodu bude připojen čítač impulsů s vyhodnocovací elektronikou. Tato elektronika bude připojena na pult ovládání jiskřiště. Propojení tlačítek k této elektronice je klíčové. Při stisknutí tlačítka na přibližování koulí se bude měřená hodnota snižovat s každým impulzem o hodnotu l (podle mého návrhu 0,05 mm). Pokud se budou koule oddalovat – stiskne se tlačítko na oddalování koulí, bude se hodnota l přičítat s každým impulzem. Výsledná hodnota bude vyvedena na výstupní displej na ovládacím pultu.

Chyba této metody je konstrukčně daná počtem děr. Nikdy se nestane, že zastavíme posun koulí přesně v místě díry. Proto se při odečítání z měřidel s dílky počítá s chybou rovnou jedné polovině dílku. Ve mnou navrhovaném případě je to 0,025 mm. Tato chyba je přijatelná. Další chyba může vzniknout při vrtání děr. Pro 26 děr je třeba je vyvrtat díry v rozteči $13,85^\circ$ tuto rozteč vypočteme pomocí rovnice (3). Pokud bychom počet děr změnili tak, aby bylo vrtání jednodušší, bude naopak složitější uložení hodnoty inkrementace délky na jeden impuls.

$$R = \frac{360^\circ}{n} \quad (3)$$

U této metody můžeme použít selsyny pro přenos natočení hřídele na dálku. V tomto případě by nebyla kruhová nástavba na přijímači selsynu. Celé měřicí ústrojí by nebylo v blízkosti jiskřiště ale mohlo by být poblíž pultu. V tomto případě je to zbytečné zavádění další chyby. Selsyny totiž přenášejí úhel natočení s chybou do 1 % tudíž další snížení přesnosti. Od světelné brány jsou převáděny do elektroniky elektrické impulzy obdobně jako u selsynů. Proto nedoporučuji používat selsyny při aplikaci této metody.

Nároky na obsluhu u této metody jsou minimální. Stačí pouze jeden člověk, který ovládá jiskřiště pomocí pultu, kde se mu v reálném čase zobrazuje i naměřená vzdálenost.

3.1.2. Měření vzdálenosti z počtu otáček pomocí magnetických elementů

Tato metoda je obdobná jako předchozí metoda. Na nástavbu se připevní magnetické prvky a jako čtecí zařízení se použije magneticky citlivé čidlo. Při otočení nástavby projede pod čidlem magnetický element a čidlo vydá impuls do elektroniky. Výpočet těchto elementů je totožný s výpočtem v kapitole 3.1.1. (4)

$$l = \frac{1,3}{n} \quad (4)$$

V našem případě bych tedy doporučoval alespoň 26 magnetických elementů. S tímto počtem dosahujeme vzdálenosti l podle rovnice (5):

$$l = \frac{1,3}{26} = 0,05 \text{ mm} \quad (5)$$

Měřená délka na jeden impuls je tedy 0,05 mm. Tuto hodnotu považuji za dostatečnou pro přesnost našeho měření. Pro zvýšení přesnosti je nutno přidat další magnetické elementy. Tento počet elementů poté dosadíme do rovnice a vypočteme novou délku na jeden impuls.

Dalším konstrukčním prvkem je vyhodnocovací elektronika. Tato musí být napojena na ovládací pult. Podle stisknutí tlačítka pro přiblížení nebo oddálení koulí bude elektronika připočítávat k výsledné hodnotě právě délku na jeden impuls l . Tuto výslednou hodnotu bude poté zobrazovat na displeji na pultu.

Chyba metody je dána konstrukčním uspořádáním magnetických elementů. Jejich počet zvyšuje přesnost samotného měření podle rovnice. Další chyba vzniká při samotné konstrukci návstavy, kde je potřeba přesně upevnit magnetické elementy s danou roztečí. Tuto rozteč spočítáme z rovnice (6):

$$R = \frac{360^\circ}{n} \quad (6)$$

Aplikace selsynů je pro laboratoř E122 zbytečná. Přenos digitálního signálu z magnetického senzoru do výpočetní elektroniky je možný bez nutnosti převádět natočení hřídele na elektrickou veličinu. Toto již zajišťuje kruhová návstava s měřicím ústrojím. Proto je zbytečné zavádět do měření další chybu.

3.1.3. Měření servomotorem

Servomotor, který by poháněl posunový mechanismus jiskřiště je pro naše účely nevhodný. Změna měřicí metody z našeho aktuálního motoru na servomotor by vyžadovala následující úpravy:

Výměna motoru - Vyměnit motor za servomotor je základní předpoklad pro aplikování této metody.

Přidání výpočetní techniky - Servomotor vyžaduje výpočetní techniku pro ovládání natočení motoru a samozřejmě kontrolu natočení.

Změna převodového mechanismu z motoru na hřídel koulí - V tuto chvíli je převod z motoru na hřídel koulí proveden řemenem, který může proklouznout. V případě servomotoru by musel být tento motor připojen přímo na hřídel koulí nebo připojen přes převodovku, která by neprokluzovala. Tím pádem by natočení servomotoru přesně odpovídalo natočení hřídele a následného posunu koulí.

Samotný servomotor se natočí podle toho, kolik nastavíme v počítači. V počítači můžeme vytvořit program, ve kterém zadáme přímo žádanou doskokovou vzdálenost a počítač sám vypočítá jak natočit

motor aby dosáhl zadané vzdálenosti. Další možnosti jako postupné přibližování koulí do stisku tlačítka, které stiskneme při přeskoku. Další možnosti můžeme nastavit v počítači.

Chyba měření je v tomto případě závislá na řídicí jednotce a její rozlišovací přesnosti. Proto tady žádnou chybu nebudu rozebírat, jelikož je závislá na použitém přístroji.

Použití servomotoru pro laboratoř E122 není vhodné zejména z hlediska velkých změn, které mohou ovlivnit i další možnosti využití této laboratoře. V této laboratoři se neměří totiž jen s kulovým jiskřištěm, ale využívá se i pro jiné měření a jiskřiště samotné musí být alespoň trochu mobilní. Také cena je velmi vysoká, proto tuto metodu nedoporučuji.

3.2. Metody měření pomocí akustiky

3.2.1. Ultrazvuková metoda

Ultrazvukové měření je velmi přesné, rychlé a jednoduché. Pro naše účely je ale mírně nevyhovující. Většina ultrazvukových přístrojů měří v ose měřicího tělesa. My bychom potřebovali měřit kolmo na tuto osu. Jednou z metod jak tuto nevýhodu obejít je vytvořit konstrukční nástavbu, která by byla složená z měřicího zařízení a plochy.

Konstrukce je teda taková, že se pevná deska umístí na úroveň pevně posazené koule. Tato deska musí splňovat vzdálenost od koulí podle tabulky Tabulka 1. Na úrovni druhé koule je tedy umístěno měřicí zařízení. Toto zařízení vysílá ultrazvukový signál, který se odráží od plochy na úrovni druhé koule. Tímto způsobem je možnost měřit doskokovou vzdálenost.

Je patrné, že při této metodě vzniká velmi velké množství chyb. První skupinu bych charakterizoval jako konstrukční chyby. Tyto chyby se vyskytují pokaždé, protože jsou dány nepřesností konstrukce, která je 12S vzdálená. Pro laboratoř E122 je S 7,5 cm, čili 90 cm od bodu přeskoku oblouku. Konstrukce by tedy pro eliminaci této chyby musela být velmi robustní, aby nedocházelo k různým prohýbům a kývání konstrukce zejména při pohybu. Druhou skupinu chyb bych pojmenoval měřicí chyby. V této skupině je patrná převážně přesnost ultrazvukového měřicího přístroje. Tato přesnost je přibližně okolo 1-3 %. Další chybou v této skupině je chyba převodníku, který může ovlivňovat výslednou přesnost. Poslední skupina chyb je dána prostředím. Ultrazvukový měřicí přístroj se kalibruje na určité atmosférické podmínky jako je teplota, tlak a vlhkost. Další chyba vzniká, pokud jsou tyto podmínky odlišné oproti podmínkám nastaveným v přístroji. Tyto podmínky jsou v prostoru, kde se zapalují elektrické oblouky velmi proměnné. Nejpatrnější je změna teploty okolí ohříváného obloukem.

Hlavní nevýhodou ultrazvuku je princip. Měří se doba, za kterou se vyslaný zvuk odrazí zpět k přístroji. V ose pohybu koulí měřit nemůžeme, protože v těchto místech dochází k přeskoku oblouku. Další důvod proč tato metoda nelze aplikovat je kulovitý tvar jiskřiště, který odráží zvuk do všech směrů. Z těchto hlavních důvodů jsem do této práce zahrnul ultrazvukové měření velmi obecně a nedoporučuji jej.

3.3. Metody měření pomocí optiky

3.3.1. Princip laserové triangulace

Princip triangulace je velmi přesná metoda, která je obtížně aplikovatelná pro laboratoř E122. Tato obtížnost je dána principem měření. Měřicí přístroje využívající laserovou triangulaci měří vzdálenost

od měřicího přístroje po daný objekt. V případě laboratoře E122 bychom tedy museli mít tento přístroj vestavěný v jedné z koulí. Toto ale nelze.

Pro tento způsob měření bychom museli vytvořit konstrukci bokem, která by se pohybovala spolu s koulemi jiskřiště. Tato konstrukce musí být z nevodivého materiálu a 90 cm od místa vzniku oblouku. Konstrukce bude utvořena z plochy na straně pevné koule a z měřicího přístroje na straně pohybující se koule. Mezera mezi deskou a měřicím přístrojem musí být shodná s mezerou mezi koulemi.

V tomto uspořádání vznikají chyby dané konstrukcí. Hlavní z nich je možná nepřesnost konstrukce její různé průhyby a kývání při pohybu. Samotné měření je velmi přesné. Tyto přístroje měří s chybou okolo 1 nm. Pokud bychom eliminovali chyby vzniklé konstrukcí, máme zaručeno, že měření vzdálenosti bude velmi přesné.

Dalším aspektem je vyhodnocovací jednotka spolu se zobrazovací. Vyhodnocovací jednotka může do měření zanést chybu. Tato chyba je ale natolik nízká, že neovlivní přesnost měření pro laboratoř E122 vzhledem k možnosti chyby konstrukční.

Tato metoda není příliš vhodná pro laboratoř E122 vzhledem k nutnosti vyrobit konstrukci, která je příčinou velkých nepřesností, které snižují vhodnost této metody. Dalším faktem je pořizovací cena takového zařízení, které je vzhledem ke své přesnosti velmi drahé.

3.3.2. Konfokální princip

Rozklad světla na jednotlivé složky barevného světla a měřit vzdálenost pomocí jedné části tohoto spektra je velmi přesná metoda, která je obtížně aplikovatelná pro laboratoř E122. Tato obtížnost je dána principem měření. Měřicí přístroje využívající konfokální princip měří vzdálenost od měřicího přístroje po daný objekt. V případě laboratoře E122 bychom tedy museli mít tento přístroj vestavěný v jedné z koulí. Toto ale nelze.

Pro tento způsob měření bychom museli vytvořit konstrukci bokem, která by se pohybovala spolu s koulemi jiskřiště. Tato konstrukce musí být z nevodivého materiálu a 90 cm od místa vzniku oblouku. Konstrukce bude utvořena z plochy na straně pevné koule a z měřicího přístroje na straně pohybující se koule. Mezera mezi deskou a měřicím přístrojem musí být shodná s mezerou mezi koulemi.

V tomto uspořádání vznikají chyby dané konstrukcí. Hlavní z nich je možná nepřesnost konstrukce její různé průhyby a kývání při pohybu. Samotné měření je velmi přesné. Tyto přístroje měří s chybou v řádu nanometrů. Pokud bychom eliminovali chyby vzniklé konstrukcí, máme zaručeno, že měření vzdálenosti bude velmi přesné.

Dalším aspektem je vyhodnocovací jednotka spolu se zobrazovací. Vyhodnocovací jednotka může do měření zanést chybu. Tato chyba je ale natolik nízká, že neovlivní přesnost měření pro laboratoř E122 vzhledem k možnosti chyby konstrukční.

Tato metoda není příliš vhodná pro laboratoř E122 vzhledem k nutnosti vyrobit konstrukci, která je příčinou velkých nepřesností, které snižují vhodnost této metody. Dalším faktem je pořizovací cena takového zařízení, které je vzhledem ke své přesnosti velmi drahé.

3.3.3. Optický mikrometr

Měření pomocí optického mikrometru je jediná metoda měření poskokové vzdálenosti v laboratoři E122, která není limitována principem měření ale technologií dnešní doby a cenou.

Pro toto měření je potřeba postavit vysílač a přijímač optického mikrometru na úroveň nejmenší vzdálenosti mezi koulemi. Pro toto je třeba vyrobit konstrukci, která by tento požadavek splňovala. Optický mikrometr je schopný v reálném čase měřit velmi přesně. Měřením se zastíní část paprsku vysílaného vysílačem koulemi tak, aby nedopadl na přijímač. Tudíž se měří průzor mezi koulemi.

V závislosti na typu mikrometru bychom odečítali naměřenou hodnotu přímo na přístroji, jeho výstupní jednotce nebo pomocí počítače. Nejideálnější by byla výstupní jednotka vyvedená na panel ovládání jiskřiště. Displej zabudovaný v přístroji nemusí být na velkou vzdálenost čitelný.

Jediný problém, který znemožňuje toto měření je vzdálenost B vycházející z Tabulka 1 Tabulka vzdáleností předmětů od kulového jiskřiště. Z tohoto údaje vyplývá, že vzdálenost přijímače od vysílače je potřeba alespoň 180 cm z důvodu bezpečnosti. Toto omezení znemožňuje bezpečně měřit pomocí optického mikrometru. Limitní vzdálenost vysílače do přijímače je totiž 50 cm. Druhý problém je samotná cena takového zařízení, která se pohybuje okolo 4000 Amerických Dolarů.

První problém je možný vyřešit omezením doskokové vzdálenosti tak, aby bylo toto měření bezpečné. Pokud musí být jednotlivé prvky optického mikrometru ve vzdálenosti 50 cm. Vychází vzdálenost jednotlivých prvků od osy koulí 25 cm místo požadovaných 90 cm. Poměrem těchto dvou vzdáleností můžeme teoreticky snížit maximální nastavenou doskokovou vzdálenost kulového jiskřiště v laboratoři, abychom zajistili měření, při kterém nedojde k poškození optického mikrometru. Takto vypočtená maximální poskoková vzdálenost je přibližně 2 cm. Toto je maximální vzdálenost, na kterou studenti při měření na kulovém jiskřišti měří v laboratoři E122. Tato varianta je teoreticky možná, důrazně ji ale nedoporučuji.

Při zvážení ceny měřicího přístroje a nutného omezení posuzuji tuto metodu jako teoreticky nevhodnou.

3.4. Metody měření pomocí elektrických veličin

3.4.1. Princip vířivých proudů

Měření pomocí vířivých proudů je možné pouze pro vodivé materiály. V Laboratoři E122 požadujeme měření délky vzduchové mezery, která není vodivá. Tudíž je toto měření nemožné.

3.4.2. Kapacitní princip

Princip popsany v kapitole 1.4.2. funguje pro většinu měření vzdálenosti. V případě laboratoře E122 však tuto metodu nelze použít.

Vzhledem k možnosti považovat obě koule jiskřiště jako elektrody kondenzátoru, je možné měřit kapacitu mezi těmito koulemi. Po změření můžeme porovnávat změřenou hodnotu kapacity s předem vypočtenými hodnotami kapacity pro danou vzdálenost. Postupným posunem koulí se budeme snažit o dosažení této hodnoty. Nebo naopak přibližovat koule až k překročení přeskokového napětí a těsně před zapálením oblouku odečíst hodnotu kapacity. Tuto hodnotu poté zpětně přepočíst na vzdálenost.

Výsledná chyba tohoto měření je závislá na chybě použitého měřicího přístroje. V následující tabulce uvedu kapacity dvou koulí ve vzdálenosti od 3mm do 75mm, pro tyto výpočty byla použita rovnice (7): [15]

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{r^2}{d} \cdot \left(1 + \frac{r^2}{d^2 - 2r^2} + \frac{r^4}{d^4 - 4d^2r^2 + 3r^4} + \dots \right) \quad (7)$$

Tabulka 2 Vypočtené kapacity pro doskovou vzdálenost

S (cm)	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6
C (pF)	277,98	138,71	92,16	68,79	54,7	45,23	38,42	33,25	29,19	25,89	23,15	20,83

3,9	4,2	4,5	4,8	5,1	5,4	5,7	6	6,3	6,6	6,9	7,2	7,5
18,82	17,07	15,51	14,1	12,83	11,65	10,56	9,54	8,58	7,65	6,77	5,9	5,06

3.5. Speciální metody

3.5.1. Měření pomocí fotoaparátu/kamery

Zajímavá a velmi interaktivní metoda, jejíž princip dnes využívají některé mobilní aplikace. V těchto aplikacích ale chybí referenční hodnota vzdálenosti.

Pro účely laboratoře E122 doporučuji fotoaparát s rozlišením alespoň 16 Mpx. Dále je třeba postavit stativ na předem určené místo tak, abychom zaznamenali alespoň větší část obou koulí a neměli je překryté Faradayovou klecí. Pro toto nastavení doporučuji co nejvíce přiblížit objektiv fotoaparátu ke kleci, aby tato byla pokud možno rozostřená. Výsledná fotografie musí obsahovat větší poloviny obou koulí a mezeru mezi nimi. Nesmí obsahovat odlesky a musí být ostrá. Doporučuji používat samospoušť nebo dálkovou spoušť pro eliminaci otřesů.

Samotné zpracování fotografie se provádí v počítači, který je propojen s fotoaparátem. Samotné zpracování fotografie a vyhodnocení výsledku je popsáno v kapitole 1.5.1

Přesnost této metody je závislá zejména na kvalitě fotoaparátu. Jsou tu ale rizika způsobená okolím. První z nich je samotné fotografování, při kterém může docházet k otřesům a následnému rozostření fotografie. Druhé riziko jsou odlesky. Silně nedoporučuji používat blesk ani různé přísvity. Světlo používat pouze takové, které se neodráží od koulí přímo do fotoaparátu. Odlesky mohou být vyhodnoceny programem jako pozadí koule nebo úplně jiný předmět. Třetí problém je eliminovat možné barevné slévání koule a pozadí. Tudiž je potřeba mít určitý kontrast mezi koulemi a pozadím. Doporučuji modrou nebo zelenou barvu.

Obrázek 8 znázorňuje možné fotografování koulí. Na samotné fotografii je patrná mírná neostrost z důvodu nepoužití časové nebo drátové spouště. Dále je vidět odlesk na pravé kouli. Tento odlesk nevznáší chybu do měření, jelikož je možno použít levou kouli pro změření referenční hodnoty.



Obrázek 8 Ukázka vyfotografování kulového jiskřiště pro následné měření

Závěr

Na závěr zhodnotím všechny metody, které vycházejí jako vhodné pro měření v laboratoři E122. Z výše vypsanych hodnot to jsou tedy: měření otáček pomocí světelné brány, měření otáček pomocí magnetických elementů, měření pomocí fotoaparátu, použití měrek, měření kapacity a částečně měření pomocí optického mikrometru.

Závěrečné hodnocení budu uvažovat podle přesnosti, ceny a nároků na obsluhu.

Nejpřesnější je optický mikrometr, který měří s přesností na mikrometry. Druhou nejpreciznější metodou je použití měrek. Tyto měrky se vyrábí přesností 0,01 mm. Třetí metodou je měření kapacity, kde je závislost přesnosti na použitém měřicím přístroji a atmosférických vlivech. Další nejpreciznější metodou je měření pomocí fotoaparátu za předpokladu správného vyfotografování jiskřiště. Nejméně přesnými metodami z vybraných jsou použití světelné brány a použití magnetických elementů. Poslední dvě jsou nejméně přesné za předpokladu použití počtu dílčích částí ovlivňujících přesnost (děr nebo magnetických elementů). Při vyšším počtu se tyto metody vyrovnají přesnosti fotoaparátu a kapacitě nebo jsou přesnější.

Z hlediska ceny je nejdražší optický mikrometr, kde se platí za vysokou přesnost a nutnou vzdálenost pro měření. Tato cena je kolem 4000 Amerických dolarů. Při kurzu 24 Korun Českých je tato pořizovací cena 96 000 Kč pouze za měřicí přístroj. Cena fotoaparátu se stativem a dálkovou spouští se pohybuje od 5 000 Kč. Do této sumy nezapočítávám cenu počítače a programátora. Tento program může být navrhnout jako téma na semestrální práci šikovnému studentovi informatiky. Měření pomocí magnetických elementů je dražší než měření pomocí světelné závory. Při použití magnetických elementů se zvyšuje cena úměrně s narůstající přesností. Tyto elementy je potřeba dokoupit. Dále magnetický senzor stojí do 2 000 Kč a výpočetní elektroniku odhaduji na cenu do 1 000 Kč. Cena kruhové nástavby se liší podle použitého materiálu. Cena světelné brány se pohybuje od 50 Kč v závislosti na velikosti světelného paprsku a vzdálenosti zdroje světla od senzoru. Výpočetní elektronika opět odhadem do 1 000 Kč. Cena kruhové nástavby opět závisí na použitém materiálu. Vyvrtání děr je poté na možnostech uživatele. Může se pokusit vyvrtat sám ručně díry nebo si je nechat vyfrézovat na CNC stroji. Předposlední je použití měrek. Sady měrek pro rozměry od 0,05 mm výše se pohybuje od 50 Kč. Je ale třeba koupit větší množství sad v celkovém měřicím rozsahu od 0,5 mm do 75 mm. Tato cena už poté může být vyšší. Nejméně nákladnou metodou je měření kapacity. Na naší fakultě se minimálně jeden laboratorní přístroj pro měření kapacity nachází. Z toho vyplývá, že není třeba jej kupovat.

Poslední dělení je náročnost pro obsluhu. Nejnáročnější je používání měrek. Před každým měřením se musí s pomocí měrek nastavit vzdálenost přímo na jiskřišti. To vyžaduje vypnuté jiskřiště a také dvě osoby. Jedna osoba ovládá jiskřiště pomocí panelu a druhá vkládá mezi koule měrky. Méně náročnou metodou je fotografování, které vyžaduje přesné nastavení fotoaparátu a správné vyfotografování. Náročnost odečítání z přístroje měřícího kapacitu je také nízká. Stačí si předem vypočíst kapacitu, které je třeba dosáhnout a tu poté nastavit na jiskřišti. V ostatních případech je potřeba sledovat displej zobrazující doskokovou vzdálenost a podle toho pohybovat s jiskřištěm.

Z tohoto srovnání nejlépe vychází metody využívající světelnou bránu a magnetické elementy. Poté měření fotoaparátem a měření kapacity. Nejméně vhodnými metodami je použití měrek a optický mikrometr z důvodu nemožnosti měřit pod napětím nebo vysoké ceny a omezení měření.

Použitá literatura

- [1]HW.cz [online]. HW server s r.o., ©1997-2014 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: www.hw.cz
- [2]Princip laserových snímačů vzdálenosti s triangulačním principem měření. *Automatizace hw* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/princip-funkce-laserovych-snimacu-vzdalenosti-s-triangulacnim-principem-mereni.html>
- [3]*Automatizace hw* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz>
- [4]Princip - Servo motor. *Pohonná technika* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/servo-motor>
- [5]Snímače polohy. *ELUC* [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1578>
- [6]*Senzory: snímací systémy* [online]. Mitutoyo [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.prominent-km.cz/fa_mitutoyo/pdf/330-339.pdf
- [7]Bezkontaktní měření rozměrů - optické mikrometry. *Automa* [online]. **2009**(4), 50-52 [cit. 2016-04-02]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/38860.pdf>
- [8][online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/38860.pdf>
- [9]Porovnání laserových a ultrazvukových dálkoměrů. *Q test* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.qtest.cz/laserove-dalkomery/porovnani-laser-ultrazvuk.htm>
- [10]PEKÁREK, DOMINIK. *Způsoby zapalování jiskřišť* [online]. Brno, 2015 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100652. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Michal Krbal, Ph.D.
- [11]Bezkontaktní měření vzdálenosti: Ultrazvukové senzory. *Pepperl+fuchs* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: http://www.pepperl-fuchs.cz/czech_republic/cs/classid_182.htm
- [12]ČSN 34 5640. *Základní zkoušky vysokým napětím. 2*. Brno: Úřad pro normalizaci a měření, 1980.
- [13]MIČKA, Bc. Jiří. *Přímé a nepřímé metody měření vysokého napětí*. Plzeň, 2012. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
- [14]ZÁRYBNICKÝ, Václav. Bezkontaktní měření vzdálenosti. *MM Průmyslové spektrum*. 2014, **2014**(3), 54. ISSN 1212-2572.
- [15] A.3 Capacitance of two spheres. *Http://www.iue.tuwien.ac.at* [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/wasshuber/node77.html>